

Das Entwicklungspotential mittelschnellaufender Dieselmotoren

Groth, Klaus

Veröffentlicht in:
Abhandlungen der Braunschweigischen
Wissenschaftlichen Gesellschaft Band 41, 1989,
S.55-82



Verlag Erich Goltze KG, Göttingen

Das Entwicklungspotential mittelschnellaufender Dieselmotoren

Von **Prof. Dr.-Ing. Klaus Groth**,
Institut für Kolbenmaschinen, Universität Hannover

(Eingegangen am 8.7.1989)

1. Einleitung

Wenn man die Frage nach dem Potential des mittelschnellaufenden Dieselmotors stellt und dabei, wie es meist der Fall ist, den kommenden Zeitraum bis zum Jahre 2000 und etwas darüber hinaus ins Auge faßt, ist es zweckmäßig, mit einer gewissen Bestandsaufnahme zu beginnen:

In den letzten 25 Jahren haben sich die Dieselmotoren, und zwar langsamlaufende 2-Takt- und mittelschnellaufende 4-Takt-Motoren, z.B. in der Seeschifffahrt, weiter durchgesetzt. Bei Schiffen über 2000 t_{dw} sind in letzter Zeit keine Dampf- oder Gasturbinen mehr installiert worden. Es handelt sich nur um einzelne Spezialfälle, in denen Überlegungen in Richtung Kohleversorgung mit Dampfkolbenmaschinen oder -turbinen zum Tragen kamen.

Im ersten Bild ist die Wettbewerbssituation bei Schiffseinbau von Mittelmotoren der wichtigsten Motorenhersteller zu erkennen. Der noch vorhandene Vorsprung europäischer Firmen sei hier hervorgehoben (1986). 1987 ändert sich die Reihenfolge etwas, die wesentlichen Aussagen bleiben jedoch erhalten [1]. Entgegen einer gelegentlich vertretenen Meinung ist, wie Bild 2 zeigt, bei den Motoren der Trend im Leistungsanteil der langsamlaufenden 2-Takt-Motoren erstens bis vor wenigen Jahren noch steigend gewesen, und zweitens ist der Leistungsanteil 1986 mit 80% noch drei bis viermal so groß wie bei den Mittelschnellläufern, die hier zur Diskussion stehen [2]. Wenn bei den Mittelschnellläufern das Bild 2 auch Rückschlüsse erkennen läßt, ist aber ein steigender Trend zu verzeichnen. Das gilt insbesondere dann, wenn man die im Bilde nicht erfaßten, anlässlich von Umbauten installierten Mittelschnellläufer mit in die Betrachtung einbezieht. Hier ist 1987 der Mittelmotorenleistungsanteil auf 25% gestiegen! Als Beispiel sei auf den spektakulären Einbau von neun MAN B&W-Motoren 58/64 mit einer Gesamtleistung von 95,68 MW hingewiesen (Bild 3).

Dieses Vordringen der Dieselmotoren auch in Regionen, in denen bisher der Turbinenantrieb traditionell und zum Beispiel unter dem Einfluß von Gewerkschaften, wie in den USA, vorgezogen worden war, geht im wesentlichen auf *die großen Fortschritte in der Steigerung der Nutzwirkungsgrade* auf nunmehr über 50%, vornehmlich bei großen Langsamläufern und die gleichzeitig ausgeweitete Anwendbarkeit billiger Brennstoffe zurück. Die Anstrengungen, Brennstoffkosten und/oder -verbrauch zu senken, haben im Motorenbau im Zuge der Entwicklung von Kapitalkosten, Brennstoffkosten und Lohnkosten immer eine hohe Priorität gehabt. Sie sind aber mit Beginn

Engine maker	Nos. of ship mounted with	Nos. of engine		Total	Horse power	%
		licenser/ licensee				
MAN B&W *	32	42	21	63	315,193	16.82
Mak	45	63	—	63	293,022	15.64
Sulzer	27	—	48	48	289,104	15.46
Pielstick	19	2	30	32	241,228	12.88
Wärtsilä	31	44	—	44	143,042	7.63
Hanshin	34	32	3	35	120,515	6.43
Deutz MWM	34	36	2	38	103,216	5.51
SWD	10	18	—	18	92,530	4.94
Bergen	6	13	—	13	36,499	1.95
Akasaka	14	14	—	14	35,760	1.91
Bombardier	4	12	—	12	34,260	1.83
SKL	7	10	—	10	26,180	1.40
Russki	5	14	—	14	24,300	1.30
Daihatsu	6	10	—	10	20,100	1.07
Mirrlees-Blackstone	4	7	—	7	19,625	1.05
GMT	3	4	—	4	17,780	
Yanmar	4	7	—	7	14,404	4.18
CKD	8	16	—	16	11,200	
Ito	3	3	—	3	10,395	
General Motors	2	2	—	2	7,200	
Makita	3	3	—	3	7,100	
Niigata	2	3	—	3	5,200	
Ruston	1	2	—	2	4,000	
Wichmann	1	1	—	1	3,193	0.17
Caterpillar	1	1	—	1	880	
Total	306	359	104	463	1,873,526	100.00
MAN B&W * including Alpha	7	20	—	20	56,672	

Bild 1:

Produktion von mittel- und schnellaufenden Dieselmotoren

IFKO – Universität Hannover – Prof. Dr.-Ing. Groth

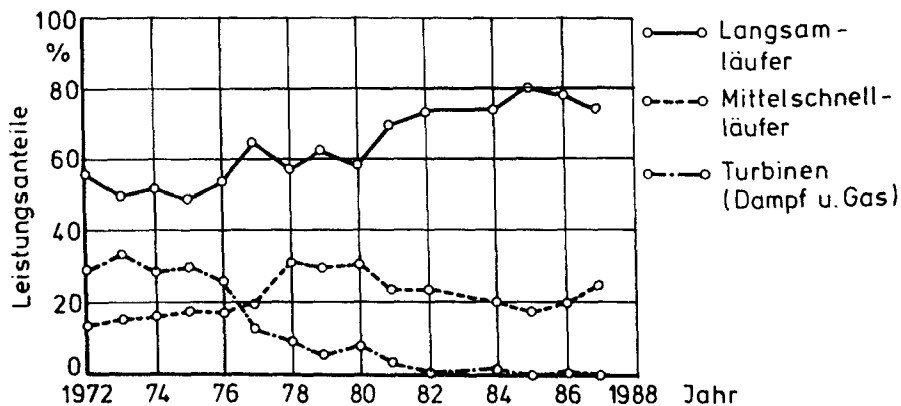


Bild 2:

Installierte Leistungen auf neugebauten Schiffen > 2000 tdw

IFKO – Universität Hannover – Prof. Dr.-Ing. Groth

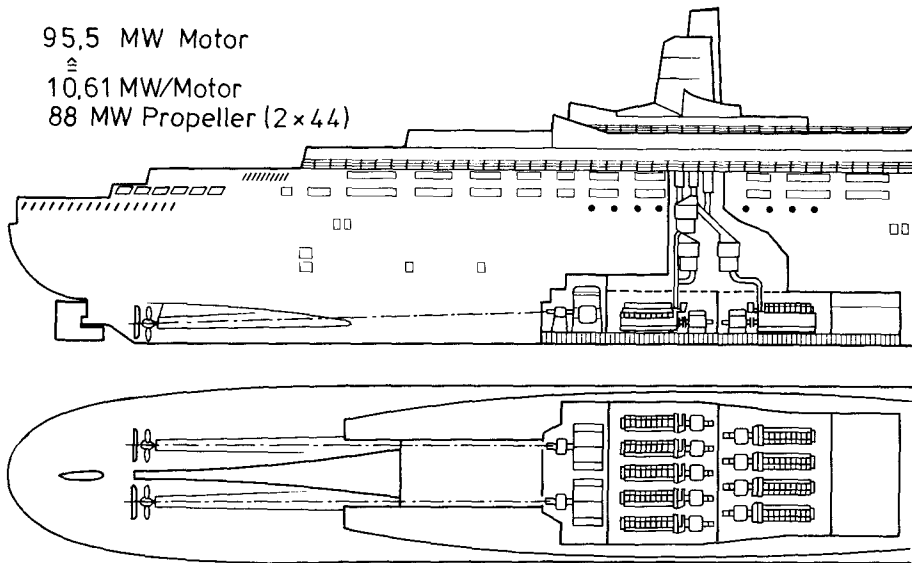


Bild 3:

QUEEN ELIZABETH 2*General arrangement of new propulsion plant*

IFKO – Universität Hannover – Prof. Dr.-Ing. Groth

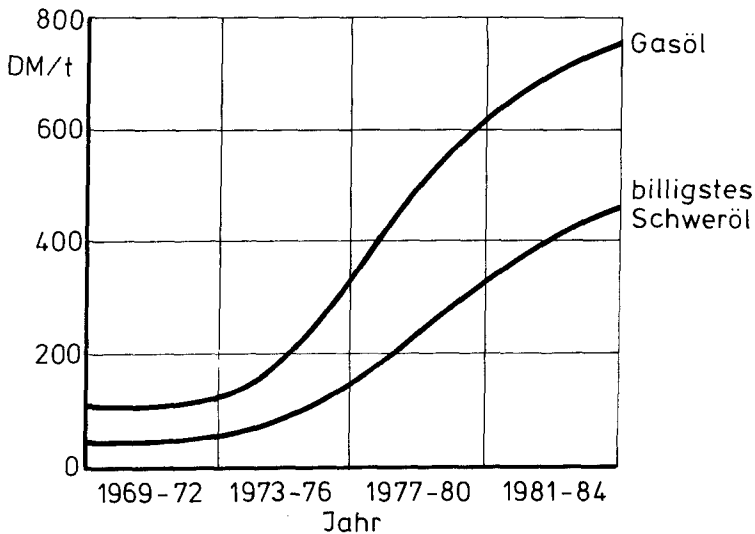


Bild 4:

Entwicklung der Kraftstoffkosten von 1969 bis 1984

IFKO – Universität Hannover – Prof. Dr.-Ing. Groth

der seinerzeitigen Ölpreiskrisen mit großem Erfolg erheblich verstärkt worden. Der Impuls, den die Ölpreissteigerung um mehr als 300% in kurzer Zeit auf die Motorenentwicklung ausgelöst hat, zeigt seine Wirkung (Bild 4) [2]. Daß Dieselmotoren heute die höchsten Gesamtwirkungsgrade aller thermischen Kraftmaschinen haben, hat inzwischen auch bei Entscheidungen von Nicht-Fachleuten Bedeutung erlangt, ist in der Politik erkannt worden und wird dort, wie wir hoffen, zu entsprechenden Denkanstößen Anlaß geben. Dieses Denken kann die Zukunft des Dieselmotorenbaus in der Bundesrepublik betreffen.

Dabei muß beachtet werden, daß der Ölpreis, der zur Zeit wieder relativ niedrig ist, *längerfristig* mit absoluter Sicherheit wieder ansteigen wird und einen steigenden Trend behalten wird. Dieser Umstand ergibt sich naturgemäß aus der bekannten Reichweite der begrenzten Ölvorräte [28].

2. Dieselmotorenentwicklung gehört zu High Tech

Daß der Motorenbau Wirkungsgrade von über 50% erreicht hat, kommt nicht von ungefähr. Die dabei getroffenen und auch mit Hilfe von neuen Technologien, sowie Einsatz von Elektronik und Mikroelektronik noch zu treffenden diffizilen Entwick-

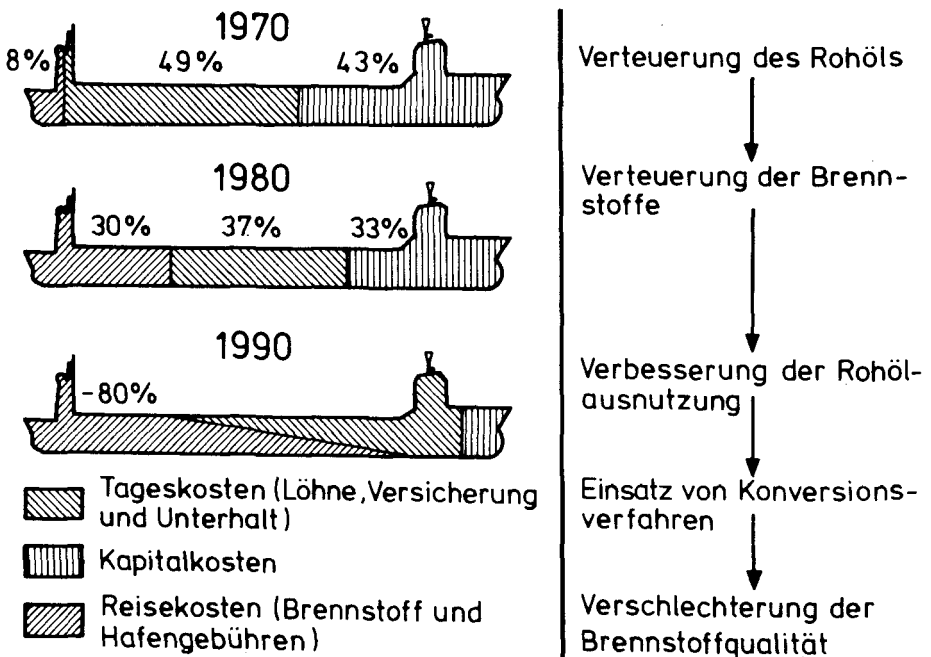


Bild 5:
Veränderung der Schiffsbetriebskosten führt zur Veränderung der Brennstoffe
IFKO – Universität Hannover – Prof. Dr.-Ing. Groth

lungsmaßnahmen und die hohe Qualität des Erreichten berechtigen uns, den Dieselmotorenbau dieser Art zur „High Tech“ zu zählen.

Daß der Umfang des Einsatzes der Mikroelektronik heute im modernen Schiffbau und Schiffmotorenbau schon sehr groß ist, sei hier am Rande erwähnt.

In dem genannten Spiel von Kapital-, Brennstoff- und Lohnkosten hat sich die Hauptzielrichtung der Entwicklung mehrfach geändert. Wir erinnern uns noch daran, daß sich die Zielrichtung: Höchstleistung der Motoren in die Zielrichtung: Billige Brennstoffe und höherer Wirkungsgrad gewandelt hat. In dem Maße, wie sich der Brennstoffkostenanteil an einer Kraftwerksanlage, zum Beispiel eines Schiffes (siehe Bild 5), erhöhte, wurden und werden gleichzeitig aufwendigere und teurere Konstruktionen rentabel.

3. Vorteile und Potential der Mittelschnellläufer

Welche Vorteile und welches Potential haben mittelschnellaufende Dieselmotoren z. B. gegenüber den Langsamläufers? Warum lohnt es sich, Entwicklungsanstrengungen zu machen, um das Potential voll auszunutzen und das bei den langsamläufenden Zweitaktmotoren Erreichte hier mindestens ebenfalls zu erreichen und ggf. zu übertreffen? Können damit größere Marktanteile erreicht werden?

Die große Attraktivität der Mittelschnellläufer besteht in ihrem kleineren Raumbedarf sowie niedriger Leistungsmasse, verbunden mit günstigen Leistungspreisen. Weiter sind im einzelnen zu nennen: (siehe auch [9])

Bild 6 – Tabelle 1:

Vorteile der Mittelschnellläufer:

- Freie Wahl der optimalen Propellerdrehzahl
- Gute Eignung für elastische Lagerung
- Sehr einfache Möglichkeit der Abwärmenutzung in verschiedener Richtung, Abgastemperaturen höher als bei Zweitakttern
- Gut geeignet für Fahren und Ro-Ro-Schiffe
- Gut geeignet für Ladepumpenantriebe
- Einfacher Wellengeneratoranbau mit Schwerölverwendung zur Energieerzeugung
- Leichter Anbau von Power- bzw. Compoundturbinen zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit mit erträglichen Amortisationszeitaussichten
- Gut geeignet für Motor-Management, Fernüberwachung und Personaleinsparung

An dieser Stelle sollen schon die *Zielsetzungen*, die das Potential dieser Motoren ermöglicht, genannt werden:

- Weitere Erhöhung der Schweröltauglichkeit (One-Fuel-Ship)

- Erhöhung der Zuverlässigkeit
- Senkung des Kraftstoffverbrauchs durch verschiedene Maßnahmen
- einfache Wartung, lange Wartungsintervalle, kurze Wartungszeiten
- längere Lebensdauer der Bauteile
- niedriger Schmierölverbrauch
- Verbesserung der Abgasemission im praktischen Betrieb unter Zuhilfenahme eines Motor-Managements
- sauberer Schwachlastbetrieb
- Geräuscharmheit

Bei allem wird wie bisher die Notwendigkeit niedriger Herstellkosten als Damoklesschwert über den Entwicklungsbemühungen stehen.

4. Entwicklung der technischen Daten und Kennwerte

4.1 Allgemeines

Hier wurden im IFKO Hannover 300 mittelschnellaufende Motoren der neueren Entwicklung mit $D = 200 \dots 650$ und $n = 400 \dots 1300$ ausgewertet [2]. Es sei kurz daran erinnert, daß 1901 der erste Tauchkolben-Viertakt Dieselmotor gebaut worden ist, der *größte* Viertaktmotor hatte $s = 1400$ und $D = 1000$ (MAN Nürnberg). Diese Entwicklung wurde jedoch bald aufgegeben. Hingegen hat der U-Boot-Antrieb in beiden Weltkriegen die Viertakt-Hochleistungsmotoren-Entwicklung und besonders die Hochaufladung stark beeinflusst. Dabei muß man an die Abmessungen 40/46 erinnern. Diese Werte haben eine zeitlang das „maritime Leben“ des Verfassers begleitet. Sie haben nach dem letzten Krieg die rasante Entwicklung der Mittelschnellläufer, über die wir hier sprechen, im zivilen Bereich sozusagen eröffnet. 1971 wurden Zylinderleistungen von 883 kW (65/65) erreicht. Die Gesamtleistung eines Motors war 17.650 kW. Neuerdings gibt es nach einem leichten Rückgang wieder den Trend zu höheren Leistungen. Mit dem 12-Zylinder 62/66 werden gegenwärtig 1417 kW pro Zylinder genannt. Der GMT-Motor erreicht mit 20 Zylindern 24.265 kW in einer Motoreinheit.

4.2 Nutzwirkungsgrad η_e

Von Interesse ist natürlich die Entwicklung des Nutzwirkungsgrades bzw. des spezifischen Verbrauches. Man hat einerseits u. a. aus 1970/80 von Woschni [3] angestellten theoretischen Untersuchungen zum Prozeß den Vorteil kurzer Brenndauer erkannt und die Möglichkeiten zur Erhöhung der Zünddrücke bereitgestellt. Damit ergab sich eine Entwicklung, wie sie in Bild 7 erkennbar ist. $\eta_e = 50\%$ wurde 1980 erreicht. Soweit möglich, sind MCR-Leistungen¹⁾ dabei berücksichtigt. ECR-Verbrauchswerte liegen ca. 3–4% niedriger. In dem von Schiff [4] übernommenen Bild sind besonders deutlich der Knick in der Wirkungsgradkurve großer Dieselmotoren über einen längeren Zeit-

¹⁾ MCR: Max. continuous rating, ECR: Economic C.R.

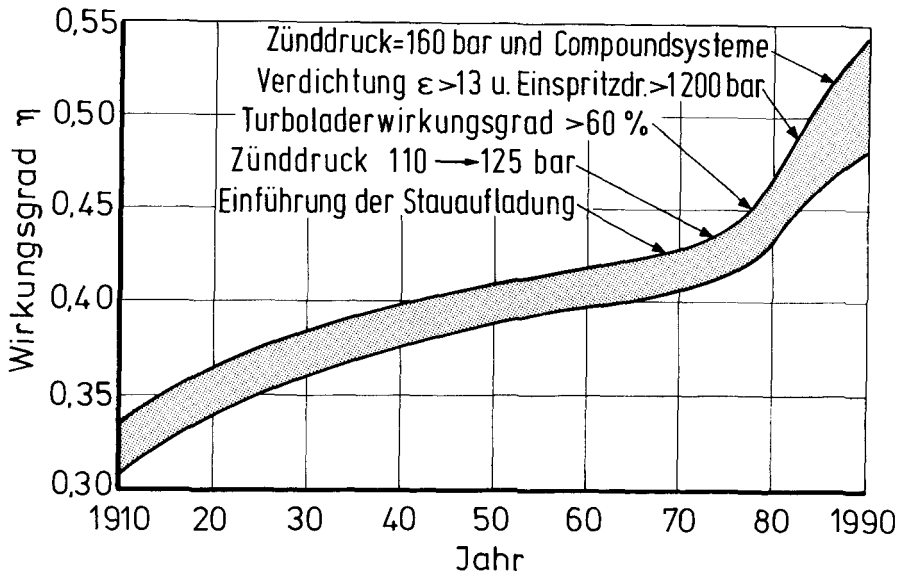


Bild 7:

Wirkungsgrad von Dieselmotoren

IFKO – Universität Hannover – Prof. Dr.-Ing. Groth

raum von 1975 bis 1980 und die Kennzeichnung von wichtigen Maßnahmen, die ihn verursacht haben, erkennbar. Der Wert von p_z/p_e hat sich bei etwa 7 eingependelt und zeigt ein weiteres Potential für Spitzendruckerhöhungen zur Senkung des Verbrauchs auf.

Jedenfalls wird mit den Bildern und den Literaturangaben deutlich, daß die Mittelschnellläufer, und zwar zunächst die größeren unter ihnen, den Anschluß an die großen langsamlaufenden Zweitaktmotoren mit einem Verbrauch von 160 Gramm/kWh ($\eta = 53\%$) mit einigen Exemplaren fast erreicht haben (Vasa 46, [11], Pielstick PC 40L570). Eine wesentliche Steigerung von η_e ist hier wohl nur mit weiteren Spitzendruckanhebungen und insbesondere mit Ausnutzung der derzeitigen Verlustenergie zu erwarten.

4.3 Hub-Bohrungsverhältnis s/D

In einer länger zurückliegenden Untersuchung des Verfassers konnte gezeigt werden, daß auch bei kleineren Dieselmotoren das Hub-Bohrungsverhältnis mit zunehmender Größe einen immer stärkeren Einfluß auf die Baugröße und die Herstellkosten der Maschine bewirkt. Im Wandel der Hauptzielsetzungen, die schon erörtert worden sind, sind Kompaktheit auf der einen Seite und niedrige Herstellkosten und niedriger Verbrauch immer wieder Gegenstand der Diskussion im Zusammenhang mit s/D gewesen. Nachdem s/D von 1972 bis 1980 immer noch um 0,2 Einheiten gesunken war – es handelte sich sozusagen um einen hang-over der Entwicklungstrends – ist mit der Zielrichtung optimaler Schweröleinspritzstrahlanpassung, Erhöhung von ϵ und Sen-

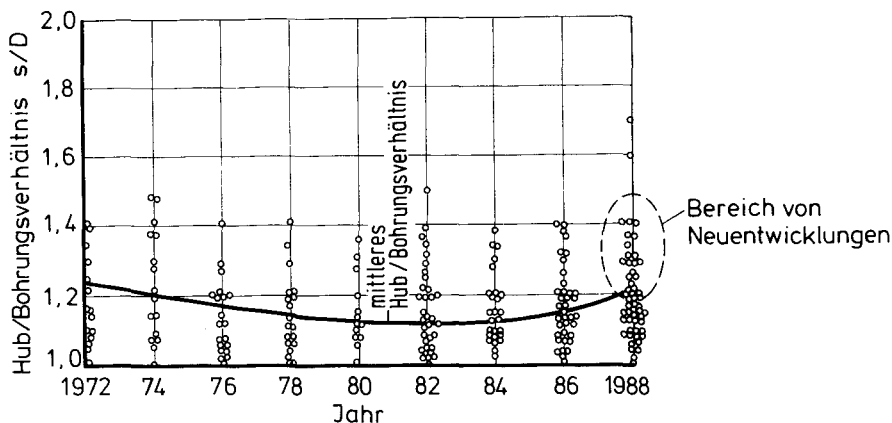


Bild 8:
Hub/Bohrungsverhältnis s/D von 1972 bis 1988
IFKO – Universität Hannover – Prof. Dr.-Ing. Groth

kung des Verbrauchs, der Wert bei den neueren Maschinen auf 1,2 bis 1,4 bzw. 1,5 angestiegen (Bild 8) [5], [6]. Mit abnehmender Schwerölqualität könnte sich in Zukunft dieser Wert auf 1,6 einpendeln.

Erste konstruktive Grenzen sind bei Tauchkolbenmaschinen etwa bei $s/D = 1,5$, und zwar bei Reihenmotoren etwas höher, bei V-Maschinen etwas niedriger, erreicht, bei darüberliegenden Werten wird der Zylinderabstand von den Kurbelwellenabmessungen abhängig. Mit weiter zunehmenden Werten, wie sie in interessanten Versuchen in Japan an älteren Maschinentypen durch Umbau ermöglicht worden sind, steigen die Herstellkosten unzutraglich stark an. Die Bauhöhe kann im übrigen durch vergrößertes Pleuelstangenverhältnis in Grenzen ausgeglichen werden [29].

4.4 Nutzmitteldruck p_e

Die Entwicklung der Nutzmitteldrücke ist naturgemäß eng verbunden mit der Entwicklung der Aufladung. Bild 9 läßt trotz starker Streuung erkennen, daß sich der rasante Anstieg von Mitte der 60er Jahre an einem asymptotischen Grenzwert nähert. Dieser Grenzwert ist von der Entwicklung der mit einstufiger Aufladung erreichbaren Druckverhältnisse der Turbolader abhängig. Wesselo hat seinerzeit $p_e = 24$ bar angegeben [7]. Inzwischen liegt der Wert 1 oder 2 Punkte darüber. Der Motor Vaasa 46 wird z. B. mit 25 bar angegeben. Der neue „on-line-optimierte“ MAN-Motor L40/54 ist mit einem Mitteldruck bis zu 26 bar erprobt worden [8]. Die Druckverhältnisse der Turbolader liegen an der Grenze der einstufigen Aufladung bei $\pi = 4,2$.

Der optimale Turboladerwirkungsgrad wird natürlich bei geringeren Druckverhältnissen erreicht. Er beträgt 0,68 bis 0,7 bei größeren Einheiten. Sicher wird man in der Zukunft den Spitzendruck noch etwas anheben können, und, wenn es gelingt die Turboladerwirkungsgrade auch im Bereich der Grenzwerte des Druckverhältnisses noch

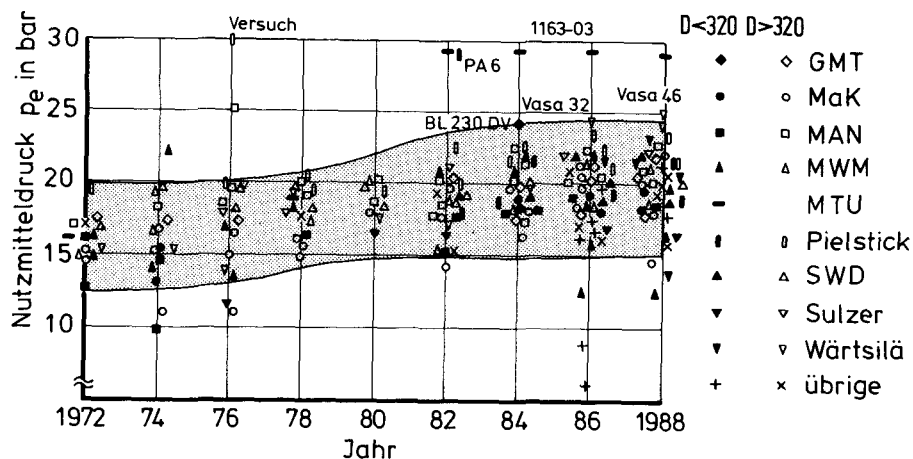


Bild 9:
Entwicklung des Nuttmitteldrucks p_e von 1972 bis 1988
IFKO – Universität Hannover – Prof. Dr.-Ing. Groth

etwas anzuheben, könnten die dann entstehenden Triebwerke optimal ausgenutzt werden. Hier muß jedoch bedacht werden, daß mit steigendem Druckverhältnis π die Reißlängen der Laderwerkstoffe zu verbessern sind. Das bedeutet z. B. Übergang von Aluminiumlegierungen auf Titan und damit Kostenerhöhungen. Auch die Lage der Pumpgrenze muß stärker beachtet werden. Versuche mit einstufigen Turboladern werden im übrigen auch mit einer axialen Vorstufe ausgeführt. Syassen weist in diesem Zusammenhang darauf hin, daß eine weitere Steigerung des Spitzendrucks die Motoren unzulässig verteuern würde [9].

Durch die beachtlichen Fortschritte in der Abgasturboaufladung ist jeweils der Anreiz, auf breiter Front zur zweistufigen Aufladung überzugehen, bisher immer wieder hinausgezögert worden. Bisher gibt es nur zwei Fabrikate, die Motoren mit zweistufiger Aufladung und $p_e = 30$ bar und entsprechenden Zusatzeinrichtungen für Höchstdruckbegrenzung, Start-, Schwachlastbetrieb und gutes Beschleunigungsverhalten anbieten [10]. Diese Entwicklung wird auf breiter Front, d. h. auch außerhalb militärischer Anwendungen, in der Zukunft interessant werden. Bei zweistufiger Aufladung wird das Druckverhältnis jedes Laders niedriger und damit der Lader billiger. Auch das Teillast- und Beschleunigungsverhalten ist zu beachten.

4.5 Mittlere Kolbengeschwindigkeit c_m

Die mittlere Kolbengeschwindigkeit c_m ist in den letzten Jahren langsamer gestiegen, nachdem vorher, besonders im oberen Motorgrößenbereich, eine unverhältnismäßig starke Erhöhung stattgefunden hatte. Die meisten neuen Fabrikate haben Werte von 9 m/s und etwas darüber. Hier ist ein Diagramm hilfreich, das 1969 von Syassen [12] begonnen wurde. Es zeigt c_m abhängig von der Baugröße Zylinderdurchmesser D

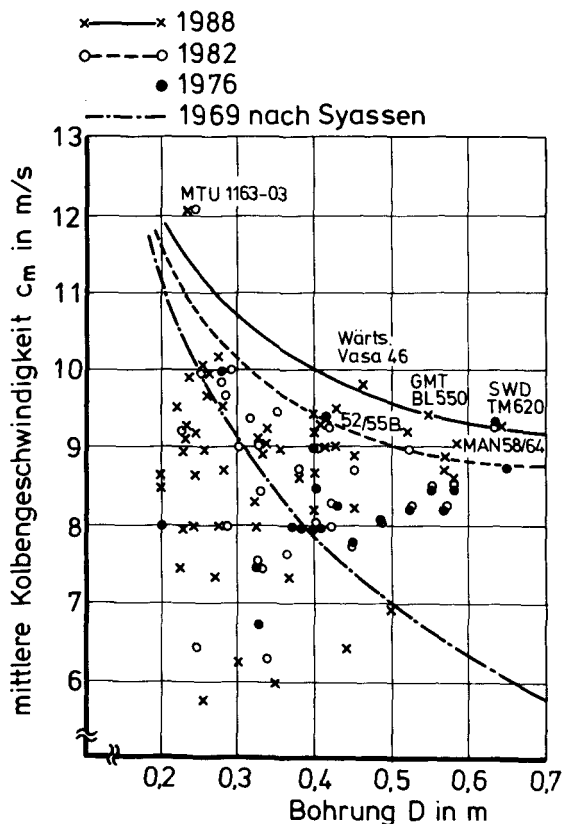


Bild 10:

Mittlere Kolbengeschwindigkeit c_m als Funktion der Bohrung D

IFKO – Universität Hannover – Prof. Dr.-Ing. Groth

(Bild 10). Nach einigen größeren Schritten liegen 1988 die Motoren von MTU, Wärtsilä, MAN, GMT und SWD im breiten Bereich von 12 bis 9,2 Meter pro Sekunde. Der Langhuber der MTU hat dabei eine gewisse Ausnahmestellung gefunden. Weitere Steigerungen würden neue Entwicklung der Werkstoffpaarung der Zylinder und Kolben und Ringe bzw. besondere Behandlung und Beschichtung zur Voraussetzung haben.

4.6 Kolbenflächenleistung l_{f_0}

$l_{f_0} = P_e / A_k$ ist proportional $p_e \cdot c_m$ und ist ein Maß für die thermische Belastung. l_{f_0} entspricht also dem Produkt aus Nutzmitteldruck und Kolbengeschwindigkeit. Dieser Wert war 1972 im Mittel bei 3000 und 1982 bei 4.000 kW/m². Zur Zeit liegt der Mittelwert bei 4100. Einige neuere Motoren, die an der Spitze rangieren, weisen Werte von 4800 und 5070 kW/m² auf.

4.7 Laufwert a

Der Laufwert a ist ein Maß für die spezifische Belastung durch Massenkräfte. Man denke dabei an die Zugbeanspruchung des Pleuels. Interessant ist dieser Wert auch deswegen, weil ihm die spezifischen Herstellkosten des Triebwerks jeweils entsprechen. Bild 11 gibt einen guten Überblick über die Abhängigkeit vom Zylinderdurchmesser. Die Maximal-Laufwerte werden bei Zylinderdurchmessern von 230 bis 280 erreicht. Die Begründung dafür, daß dieser Wert mit größerem und kleinerem Zylinderdurchmesser geringer ist, wurde schon früher vom Verfasser angegeben [13]. [Bei größerem Durchmesser sind zu nennen: steigendes Risiko, ungünstigere Durchschmiedung als bei kleineren Durchmessern, steigende Differenzen bei Verformungen und thermischen Spannungen, thermisch bedingte, ungünstigere Spiele].

In Bild 11 hat sich die obere Grenze nach oben verschoben. Die untere Grenzkurve ist ebenfalls erkennbar. Bei kleineren Motoren gibt es eine größere Vielfalt von Model-

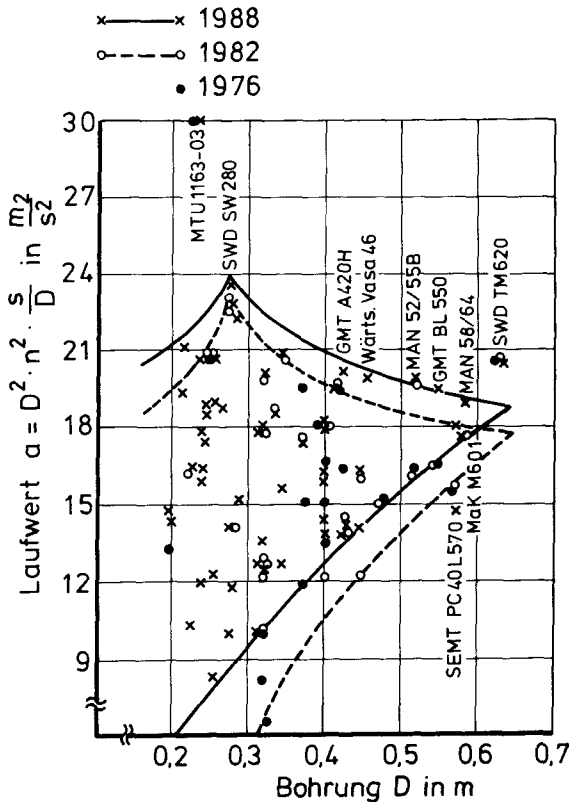


Bild 11:

Laufwert als Funktion der Bohrung D

IFKO – Universität Hannover – Prof. Dr.-Ing. Groth

len und Anwendungen. Diese Motoren sind robust, billig, und für niedrigere Belastungen ausgelegt.

5. Anmerkungen zu den Hauptproblemen der zukünftigen Entwicklung

Nachdem wir nun die zeitliche Entwicklung der technischen Daten und Kennwerte betrachtet haben, wollen wir uns einigen ausgewählten relevanten Problemen der zukünftigen Entwicklung zuwenden.

5.1 Weitere Senkung des spezifischen Verbrauches, Einspritzung

Weitere Senkungen des Verbrauches sind mit der Steigerung des Spitzendruckes im Zylinder bis zu der Grenze zu erwarten, bei der die Herstellkosten stark zunehmen. Das ist insbesondere der Fall, weil dann die Triebwerksabmessungen, z. B. die Motorlänge, bestimmen. Das trifft etwa bei einem Spitzendruck zwischen 180 bis 200 bar zu. An der oberen Grenze werden die Verbesserungen im Verbrauch, je nach Spitzendruckanstieg, geringer. Sie liegen jetzt bei ca. 1,8 bis 2,3 Gramm/kWh je 10 bar. Da zu jedem zulässigen Spitzendruck ein bestimmtes, optimales Verdichtungsverhältnis ϵ gehört, ist eine sorgfältige Abstimmung von Ladedruck und Verdichtungsverhältnis notwendig.

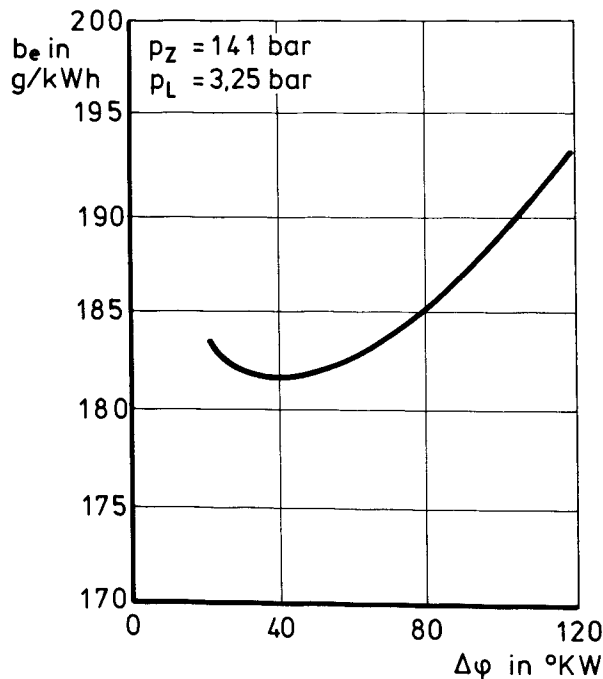


Bild 12:
Einfluß der Brenndauer auf den spezifischen Kraftstoffverbrauch
IFKO – Universität Hannover – Prof. Dr.-Ing. Groth

Der Einfluß, den das Hub-Bohrungsverhältnis hat, wurde schon diskutiert. Wenn man etwa von konstanter Brennraumgröße ausgeht, wird das optimale s/D mit steigendem Spitzendruck größer [5], [14].

Außer dem Spitzendruck hat die *Brenndauer* einen wesentlichen Einfluß auf den spezifischen Verbrauch. Sie liegt heute bei Mittelschnellläufern bei ca. 400 bis 500 U/min im Optimum bei 45° KW, wie Bild 12 zeigt [15], [3]. Um in dieser Richtung Fortschritte zu erzielen, wurde schon in den zurückliegenden Jahren die Einspritzintensität erhöht. Dabei ist jedoch das Teillastverhalten zu beachten. Es darf sich nicht verschlechtern. Die Forschungsarbeiten müssen weiter darauf gerichtet sein, den Zusammenhang von Einspritzverlauf und Brennverlauf bzw. Einspritzdauer und Brenndauer noch genauer zu erforschen. Dazu haben Woschni und Mitarbeiter in München und Thiemann in Hamburg gerade neue Beiträge, allerdings für Schnellläufer, geleistet [16], [17].

Dabei gibt es häufig ein Verbesserungspotential hinsichtlich der Form des Einspritzverlaufes – *Injection rate tailoring* –. Gleichzeitig kommt es darauf an, den Zündverzug so weit wie möglich zu vermindern. Damit gelingt es dann z. B. auch bei schnell-

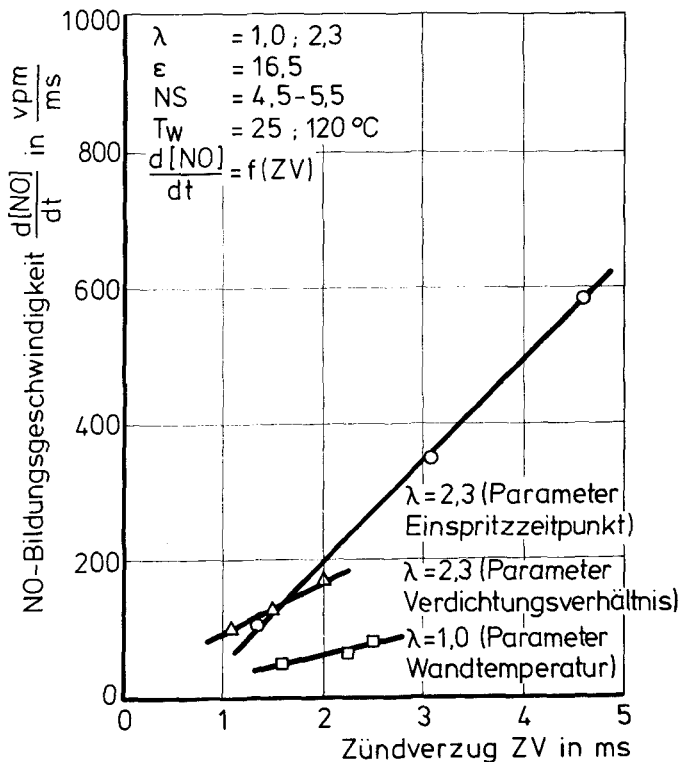


Bild 13:
NO-Bildungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Zündverzug
IFKO – Universität Hannover – Prof. Dr.-Ing. Groth

laufenden Motoren, den Verlauf so umzugestalten, daß aus dem Doppel-Vibe-Verlauf ein einfacher Vibe-Verlauf wird. Die erste Umsatzspitze rutscht dann in den Hauptumsatzbereich hinein: Der steile Druckanstieg im ersten Teil des Umsatzes verschwindet. Dieser harte Druckanstieg führt zu erhöhten Beanspruchungen, Geräuschemission, Schwingungen und starkem Anstieg der NO_x -Bildungsgeschwindigkeit (Bild 13, [18]). Die erforderliche Erhöhung der Einspritzintensität muß dabei vornehmlich durch Erhöhen des Einspritzdruckes erfolgen. Das kann durch eine Vergrößerung der Pumpenstempelgeschwindigkeit und Vergrößerung des Stempeldurchmessers erreicht werden. Auch der Verlauf der Stempelgeschwindigkeit während des Einspritzvorgangs ist von großer Bedeutung, ganz zu schweigen von den notwendigen Abstimmungen im

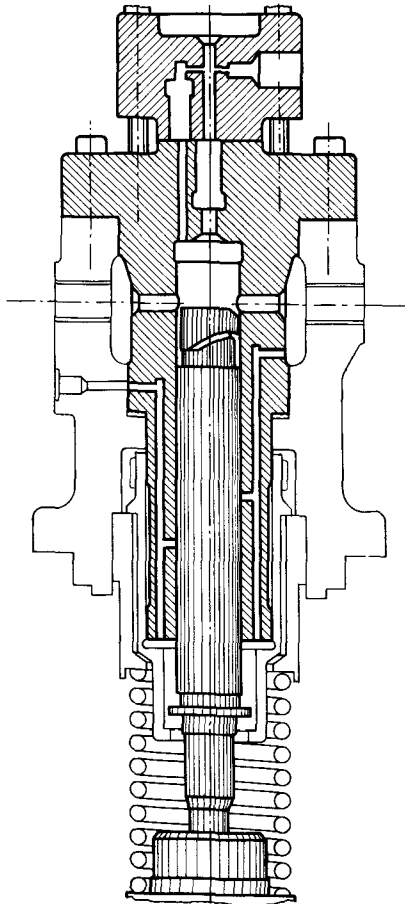


Bild 14:

Sacklocheinspritzpumpe

IFKO – Universität Hannover – Prof. Dr.-Ing. Groth

Bereich des Nockens bzw. seines Antriebs und der Festigkeitsprobleme im Pumpenbereich. Letzteres hat ja bereits zu einem Pumpenzylinder ohne aufsetzbaren Zylinderkopf, der sogenannten Sacklochpumpe, geführt (Bild 14, [15]).

Ob auch noch andere Verfahren der Druckerhöhung, wie z.B. die Bereitstellung eines regelbaren Vordrucks auf der Saugseite der Einspritzpumpe [9] sich einführen werden, muß sich erst noch zeigen.

Natürlich darf die erhöhte Pumpenleistung, die bei steigender Einspritzintensität auch die Steigerung des Leckstromes zu decken hat, nicht übersehen werden. Das führt insgesamt dazu, daß der Vorteil im Innenwirkungsgrad, der mit erhöhter Einspritzintensität verbunden ist, durch den ansteigenden Antriebsaufwand aufgezehrt wird. Generelle Angaben des Grenzdruckes, bei dem dies geschieht, können kaum gemacht werden. Nach eigenen Messungen bei einem Motor mit $n = 1200 \dots 1500$ pro Minute lag dieser Wert bei 1350 bar. Bei einem größeren Motor, wie er im Rahmen eines unserer Arbeitskreise der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen untersucht wurde, lag der Wert zwischen 1500 und 1550 bar. Zum grundsätzlichen Vorgang sei hier noch einmal ein prinzipiell bekanntes Bild 15 gezeigt [15].

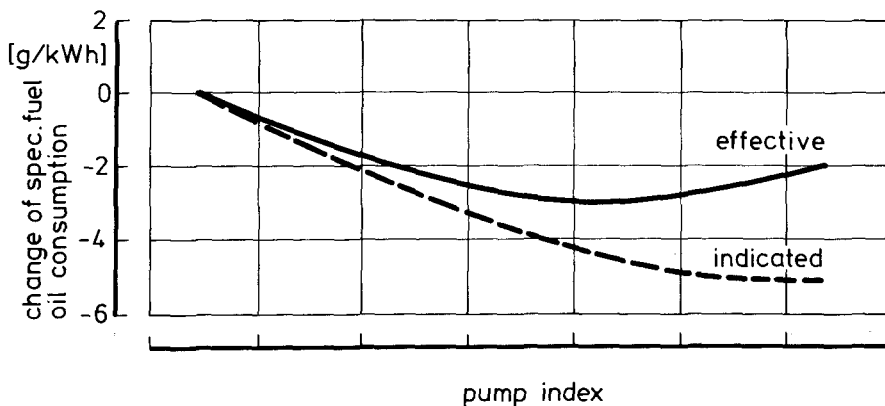


Bild 15:

Ermittlung der optimalen Einspritzintensität

IFKO – Universität Hannover – Prof. Dr.-Ing. Groth

Zur Senkung des Zündverzuges wird man nun die *Piloteinspritzung* wieder neu beleben müssen, die ja schon vor vielen Jahrzehnten bei den Motoren mit unterteilten Brennräumen bekannt war. Erinnert sei hier an die Pintaux-Düse und in einfachster Form an die Drosselzapfendüse, wie sie im Straßenfahrzeug-Kammer-Motor verwendet wird.

Die Piloteinspritzung etwa mit zwei Pumpenstempeln, ermöglicht in diesem Zusammenhang durch Ändern des Pilotanteils und/oder des Zeitabstandes zur Haupteinspritzung eine günstige Anpassung an unterschiedliche Zündeigenschaften (Cetanzahlen) der Brennstoffe. Der Gesamtdruckverlauf kann im Bereich der Zündung und danach

weitgehend beliebig gestaltet werden. Die komplexe Prozeßrechnung für die Piloteinspritzung wurde kürzlich im Rahmen einer Doktordissertation ausführlich auf den neuesten Stand gebracht [17].

Ob zwei getrennte Düsen vorhanden sein müssen oder beide Mengen – Pilotmenge und Hauptmenge – durch *eine* Düse eingebracht werden, ist eine andere Frage. Wichtig ist in jedem Fall, daß der Zündverzug gesenkt wird, ohne daß der Rauchwert ansteigt. Die Gefahr, in die Flamme zu spritzen, ist bei diesem Verfahren durchaus gegeben.

Natürlich wäre hier eine Hochdruckspeicher-Einspritzanlage mit ihrer großen Flexibilität von Vorteil. Ob dabei elektronische Steuerungen, wie bereits erprobt, oder hydraulische oder Kombinationen von beiden angewendet werden, wird insbesondere von der geringeren Störanfälligkeit abhängen.

Die größere Flexibilität bezieht sich auf die Kraftstoffeigenschaften und aber auch auf die Veränderung des Last- und Drehzahlpunktes im Kennfeld der Maschine. Die mit sinkender Drehzahl nachlassende Einspritzintensität oder jene Verschlechterung am Anfang und am Ende der konventionellen Einspritzung muß es bei Speicheranlagen dieser Art *nicht* geben.

5.2 Abgasemission

Hier muß nun auch die Frage der Abgasemission bei den Mittelmotoren angesprochen werden. Das ist umso dringlicher, als die Frage des „One-Fuel-Ships“ im Raum steht. Das bedeutet, daß z.B. auch im Schwerölbetrieb in der Revierfahrt, im Ladebetrieb bei Motortankern und im allgemeinen Hafenbetrieb die Abgasbestimmungen eingehalten werden müssen.

Es gibt, etwas verkürzt dargestellt, mindestens drei Möglichkeiten, sich mit dem Problem auseinanderzusetzen:

1. Grundsätzlich kein Hafenbetrieb mit motorischer Energieerzeugung. Stichwort: Strom von Land.
2. Umschaltung der Schwerölmotoren im Sinne eines Motor-Managements von Fahrt in See „Economical best point“ auf Hafenbetrieb „Emission best point“, so daß die Vorschriften im Hafen erfüllt werden.
3. Allgemeine Anpassung der Motoren an die Abgasvorschriften. Spezifischer Verbrauch ist dann jedoch nicht optimal.

Das IFKO Hannover ist gerade, vom BMFT gefördert, zusammen mit dem GL dabei, eine Untersuchung der Emission im Schwerölbetrieb auszuführen [30]. Die Schwefelgehalte bis 4 oder 5 % sind dabei sowohl hinsichtlich der Meßtechnik als auch bezüglich der Verbesserung der Emission ein besonderes Problem, das es zu lösen gilt.

5.3 Aufladung und Gaswechsel

In den letzten zehn Jahren hat die Entwicklung der Abgasturbolader hinsichtlich Druckverhältnis, Wirkungsgrad- und Kennfeldbreite beachtliche Fortschritte gemacht. Hier ist zu bedenken, daß eine Wirkungsgradsteigerung des Turboladers um einen Punkt den spezifischen Brennstoffverbrauch um ca. 0,2 Gramm/kWh senken kann.

Die Höchstwerte bei großen Turboladern haben den Wert von 70% überschritten. Naturgemäß hat die Steigerung dieser Wirkungsgrade auch einen Einfluß auf die Wahl des Aufladeverfahrens gehabt. Dennoch sind alle Systeme noch nebeneinander vertreten: Stoßaufladung, Stauaufladung und z.B. MPC-System²⁾, wobei letztere Systeme die Vorteile der beiden ersteren zu vereinen suchen.

Die im Aufbau einfachste und kostengünstigste Methode ist die Stauaufladung. Sie hat im Teillastbereich auf der Propellerkurve einige Nachteile, die z.T. ausgeglichen werden konnten. Erfahrungen mit dem beim Motor Vasa 46 eingeführten Swirl Ex-charge System – ein Wirbelstoß-Ladesystem – wie auch mit dem Sulzer-Einrohrverfahren liegen im Vergleich zu anderen noch nicht vor.

Auch wird man ständig weiterbemüht sein, Strömungsverlustquellen zu beseitigen. Hier sei nur stellvertretend für viele andere Möglichkeiten auf die wirkungsgradsteigernde Anordnung der Diffusorabgasleitungs Kanäle – auch bei größeren Viertaktmotoren – hingewiesen (Bild 16).

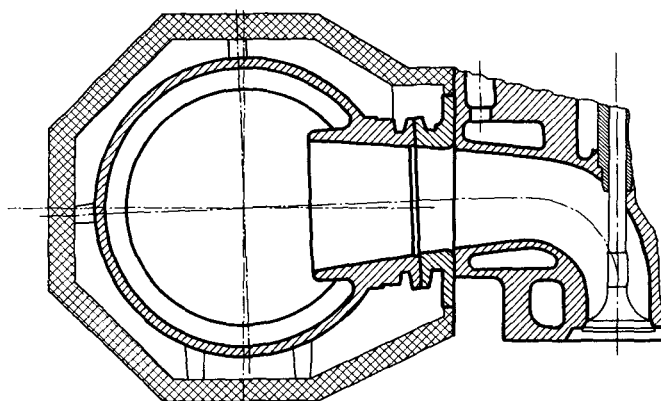


Bild 16:

Diffusor-Auslaßkanal eines 4-Takt-Dieselmotors

IFKO – Universität Hannover – Prof. Dr.-Ing. Groth

Die Aufladung hat bei Mittelmotoren aus prinzipiellen Gründen lange vor dem Einsatz für schnellaufende Straßenfahrzeug-Dieselmotoren Eingang gefunden. Die Anpassung des Turboladers an die geforderte Drehmoment-Charakteristik des Motors, die wegen der völlig unterschiedlichen Schluckcharakteristik der Kolbenmaschine und Liefercharakteristik der Turbomaschine sehr problematisch ist, war aber bei größeren Motoren mit Belastung auf der Propellerkurve erst später nötig als bei Kraftfahrzeug-auflademotoren mit ihrem dort gewünschten hohen Drehmoment bei niedrigen Drehzahlen.

²⁾ MPC: Multi pulse converter

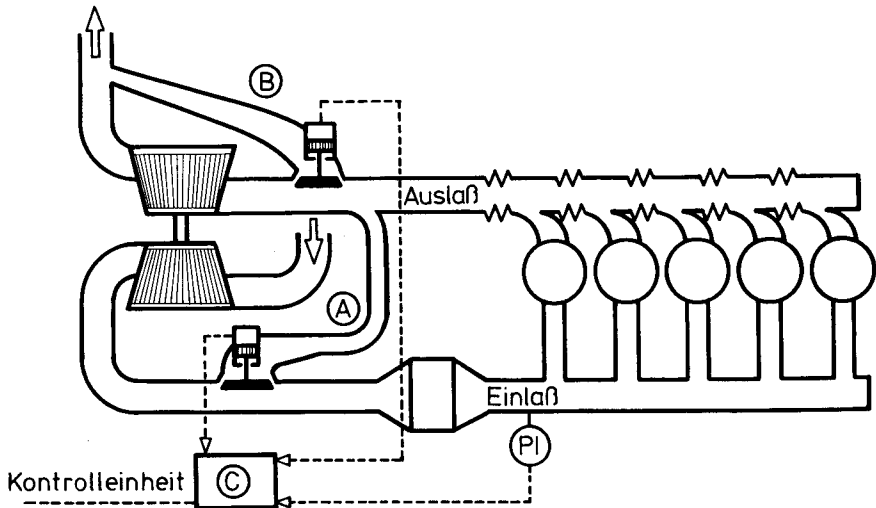


Bild 17:

Aufladesystem mit Bypass A, Waste Gate B und Kontrolleinheit C

IFKO – Universität Hannover – Prof. Dr.-Ing. Groth

Die heutigen und zukünftigen Anpassungsmöglichkeiten zum Erreichen eines hohen Motormomentes bei niedriger Drehzahl u. a. zur verbesserten Beschleunigung der Maschine sind inzwischen vielfältig. Hier seien genannt: Verstellen der Leitschaukeln auf Turbinen- und Laderseite, Bypassregelungen, Hilfsgebläse, Registeraufladung. Bild 17 zeigt ein Beispiel.

Bei einer für Vollast ausgelegten Aufladung werden Bypassventile und -leitungen benutzt (A im Bild 17). Bei Teillast reicht der Abgasstrom zum Antrieb der Turbine nicht. Es wird dann ein Ventil zwischen Ladeluftleitung und Abgasleitung vor der Turbine geöffnet. Damit kann der Lader hochgetrieben werden. Die Umblasemengen liegen abhängig von der Größe der Teillast in der Größenordnung von 25% des Gesamtluftdurchsatzes. Ob die Entnahme vor oder hinter dem Ladeluftkühler erfolgt, ist von untergeordneter Bedeutung [19].

Das Umblasen hat besondere Bedeutung für die Verminderung der Gaswechselarbeit im Staubetrieb in Verbindung mit verminderter Ventilüberschneidung. Dabei bleiben die für Schwerölbetrieb wichtigen Temperaturen an den Auslaßventilen auch bei Entnahmen hinter dem etwa aufgeheizten Ladeluftkühler unter den gesetzten Grenzen (Bild 18). Außerdem kann eine größere Pumpstabilität des Laders (bei Drehzahlrückung) erreicht werden.

Legt man die Aufladung z.B. im Sinne besserer Beschleunigung für den Teillastbetrieb optimal aus, wird bei Vollast das Waste Gate geöffnet. Die Abgase gehen z.T. an der Turbine vorbei.

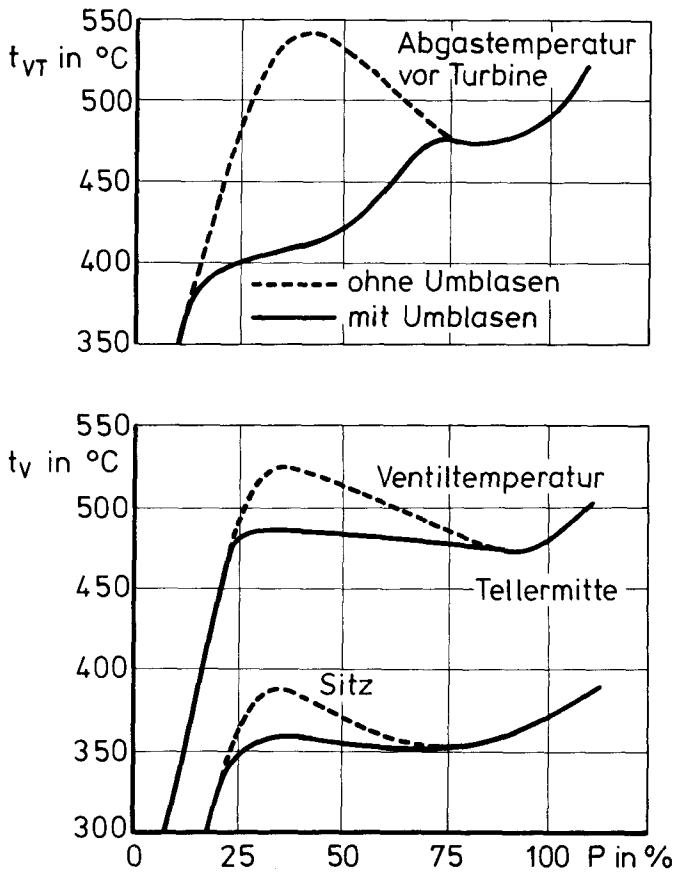


Bild 18:
 Propellerbetrieb mit kleiner Ventilüberschneidung
 IFKO – Universität Hannover – Prof. Dr.-Ing. Groth

Beim Gaswechsel muß auf das Abstimmungspotential nicht nur für gute Luftfüllung, sondern auch für geringe Gaswechselarbeit, hingewiesen werden. Das ist ohne erheblichen Versuchsaufwand nur mit guten Rechenmodellen zu bewältigen. Hier gibt es einige gute Beispiele aus neuerer Zeit:

Bild 19 zeigt, wie es an einem Motor MaK 3 M 601 gelungen ist, den aufzuwendenden Teil der Gaswechselarbeit durch Steuerzeitenabstimmung erheblich zu senken [20]. Bildteil B zeigt das Ergebnis solcher Anstrengungen – hier insbesondere strömungsgünstigerer druckrückgewinnender Kanalausführungen – bei dem neuen MAN B&W-Motor 6L40/54 im Staubetrieb [8].

Der negative Anteil der Gaswechselschleife ist nur noch gering. Der Gewinn entspricht hier der Senkung des spezifischen Verbrauches von Δb_e von mehr als 1 g/kWh.

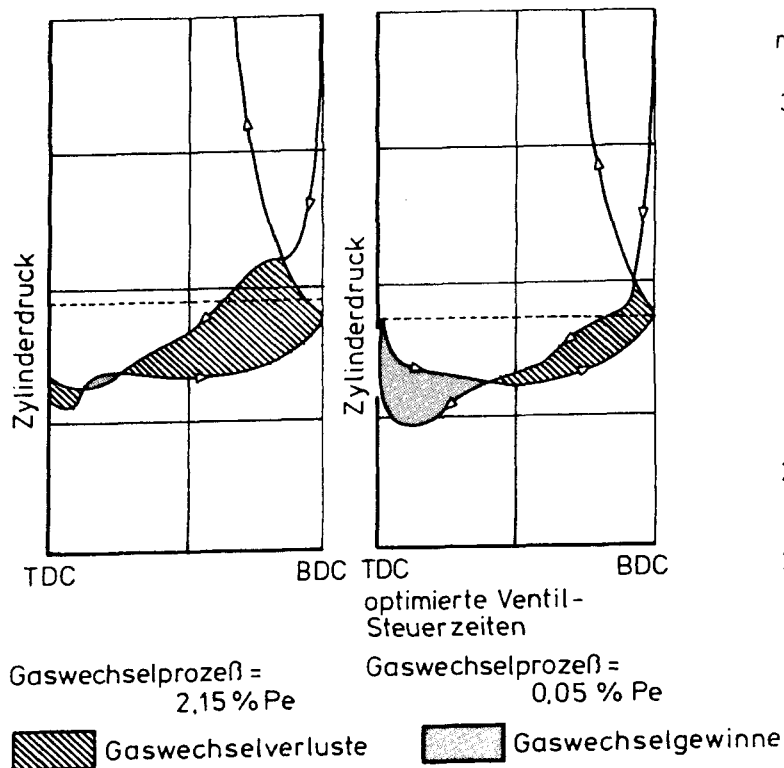


Bild 19a:
Verbesserung des Ladungswechsels am Versuchsmotor MaK 3 M 601
 IFKO – Universität Hannover – Prof. Dr.-Ing. Groth

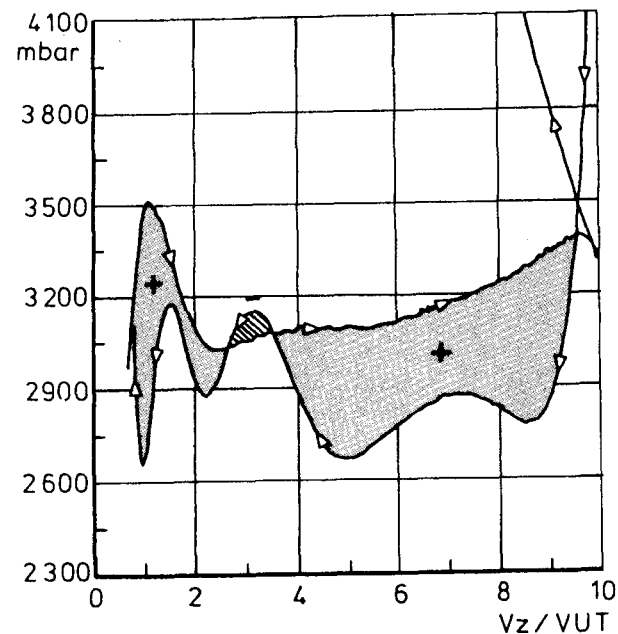


Bild 19b:
Ladungswechselschleife beim Motor MAN B&W 6L 40/54
 IFKO – Universität Hannover – Prof. Dr.-Ing. Groth

5.4 Vermehrte Ausnutzung von bisherigen Verlustenergien

5.4.1 Nutzturbinen

Die Zunahme der Abgasturboladerturbinenwirkungsgrade hat die Folge, daß nun weniger Abgas zum Antrieb der Lader benötigt wird. Man kann also mehr und mehr Abgasenergie für andere Zwecke ausnutzen. Hierzu erhielt Prof. Zinner bereits 1957 ein Patent. Es bietet sich das weite Feld der Nutzturbinen in mehreren Schaltungsmöglichkeiten an. Die Nutzturbine kann z. B. parallel zur Turboladerturbine oder in Serie geschaltet sein. Kürzliche Untersuchungen von Bozung und anderen [5], [2], [21] haben gezeigt, daß mit einer einfachen Ausführung mit Einspeisung der Nutzturbinenleistung in die Kurbelwelle 2 bis 3% spezifische Verbrauchssenkung bei geringer Amortisationszeit erreichbar sind. Pucher hat kürzlich gezeigt, daß der Abschaltpunkt bei einer Nutzleistung von ca. 55% liegt. Bei einer Abzweigrate von 12,7% war Δb_e 2,7 Gramm/kWh. Mit zunehmender Abzweigrate kommt man näher an die Pumpgrenze. Die Nutzung der mechanischen Energie der Nutzturbine ist möglich wie folgt:

- direkt über ein Getriebe (z.B. Planetengetriebe)
- über eine Föttingerkupplung auf der Kurbelwelle
- direkt über ein hydrostatisches Getriebe auf der Kurbelwelle
- Antrieb eines Generators über ein Getriebe zur Verwendung im elektrischen Netz

Dabei ist interessant, auf ein von MAN B&W entwickeltes Prinzip hinzuweisen [2]:

Ein im Schalldämpfer des Turboladers angeordneter Elektromotor bzw. Generator ist mit der Turboladerwelle fest gekuppelt. Der Elektromotor kann dabei anstelle eines Hilfsgebläses als Start- und Teillasthilfe eingesetzt werden. Im Lastbereich über 60% arbeitet er als Generator und liefert Energie an die Kurbelwelle des Hauptmotors oder Strom in das Bordnetz.

5.4.2 Rankine-Prozeß

Ein bis heute nur in geringem Umfang genutztes Potential ist in den Rankine-Prozessen zu sehen. Hierbei wird versucht, sämtliche Abwärmen aus Abgas, Ladeluftkühlung, Zylinderkühlwasser und Schmieröl incl. Kolbenkühlung zu verwerten. Als Beispiel dafür sei Bild 20 erwähnt. Es handelt sich um Mitsubishis Super Turbo Generating System DMAP Mark II [23]. Das Abgas wird in der Abgasturboladerturbine und in der parallel geschalteten Nutzturbine entspannt. In vier Stufen wird Wasser erhitzt, in einer Mischdruckdampfturbine entspannt und anschließend kondensiert. Bei dem verwendeten Arbeitsmedium kann es sich um das Kühlwasser der Ladeluftkühlung handeln. Die Dampfturbine und die ab 55% Last arbeitende Nutzturbine treiben einen Generator an, der wiederum den Strom in das Bordnetz oder bei geringem Bordbedarf ein auf der Kurbelwelle angeordnetes Generator-Motor-Aggregat speist.

Sollte durch den Abwärmeprozess nicht genug Elektrizität erzeugt werden (hier 500 kW bei einem 15 MW Motor), so wird mit dem Wellengenerator-Motor-Aggregat der Hauptmaschine die fehlende Menge erzeugt. Aus dieser Anordnung folgt neben der Verbesserung durch die Nutzturbine eine nochmalige Wirkungsgradsteigerung von

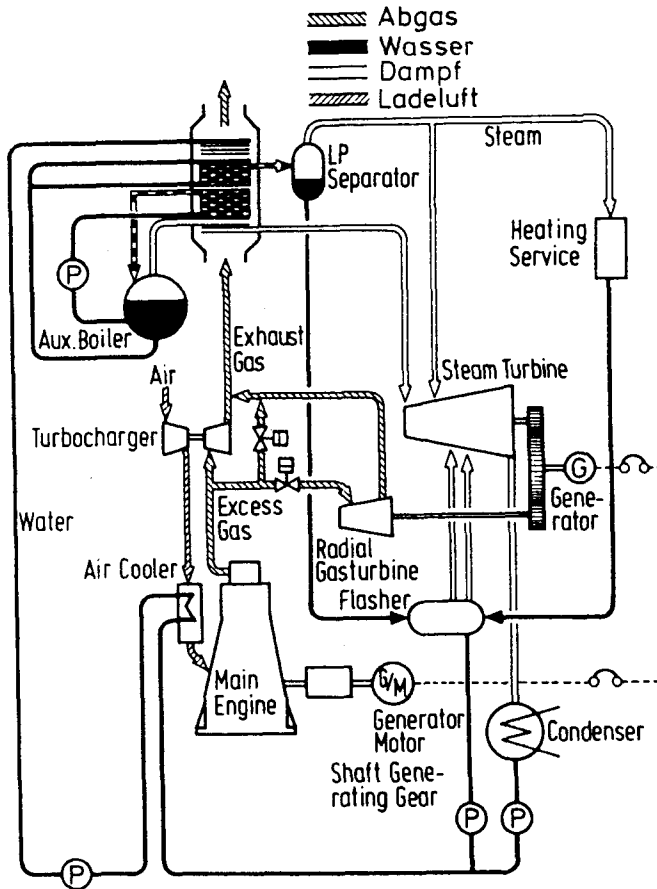


Bild 20:

Mitsubishi's Super Turbo Generating System
IFKO – Universität Hannover – Prof. Dr.-Ing. Groth

2 bis 3%. Das entspricht bei einer installierten Leistung von 15 MW einer Kraftstoffersparnis von 1,3 t pro Tag. Es handelt sich im übrigen um den Tanker „TOKIO Maru“.

Hier ist auch auf die Einbindung von z.B. Absorptionskühlanlagen und Wärmepumpen hinzuweisen, wobei noch höhere Wärmeausnutzungen möglicher erscheinen als bisher. Auch an die Verwendung von Kohlenwasserstoff ist dabei zu denken. Die seit langem bekannte Heißkühlung könnte erneut an Bedeutung gewinnen, wobei aber das Temperaturniveau der Kühlströme gesteigert und bestimmten Zwecken angepaßt werden könnte.

Diese Prozesse haben den Vorteil, an die jeweiligen Voraussetzungen optimal angepaßt werden zu können. Sicher ist es jedoch wünschenswert, wenn in Zukunft eine gewisse Standardisierung für bestimmte Anwendungszwecke Platz greifen könnte.

5.5 Keramik

Alles, was in diesem Zusammenhang zu höheren Bauteiltemperaturen führt, dazu gehört auch die „Hot Engine“ mit kleinem Luftverhältnis λ , lenkt die Aufmerksamkeit auf die dazu geeigneteren Werkstoffe. Zu ihnen gehört die Keramik. Hier muß man vorerst vor übertriebenen Erwartungen warnen. An wenigen Stellen, an denen es Vorteile bringt, wie z. B. bei Portlinern und örtlichen Kolbenabdeckungen, kann sie zur Wärmeisolierung dienen. Als *Verschleißschutz* an heißen Stellen, wie bei Ventilsitzringen, Ventilführungen, Kolbenringen u. a. m. erscheint sie geeigneter. Sicher ist es z. B. sinnvoller, den Wärmeeinfall in ein Ventil durch entsprechende Werkstoffe erträglich zu machen, oder besser noch zu vermindern, als mit hohem Aufwand die in das Ventil einfallende Wärme abzuführen und eine immer größer werdende Wärmesenke im Brennraum zu schaffen.

Bezüglich des Einsatzes von Keramiken sollte man sich über die spezifischen Eigenschaften der verschiedenen Keramiken zunächst klar werden. Bild 21 zeigt einige wichtige Werte. Dabei sind für den Konstrukteur außer den Wärmeleitzahlen z. B. für Preßpassungen und ähnliche Aufgaben besonders die Wärmeausdehnungszahlen von Bedeutung. Wegen der Verschleißigenschaften und der Oberflächentopographie werden zur Zeit für fünf verschiedene Keramiken gerade im IFKO Hannover umfangreiche Untersuchungen angestellt. Dabei zeigen sich besonders zu letzterem deutliche Probleme. Die Frage nach der für Keramik und Partner geeigneten Heißschmierstoffe harrt ebenfalls noch der Erforschung. Sicher kommen dabei in Zukunft keine Schmierstoffe organischen Ursprungs mehr in Betracht. Im Bereich der anorganischen wird man die Probleme Filmbildung, Haftung und Aufreibung etwa mit Gasschmierstoffen,

Material	Bezeichnung	E GPa	σ_{BRT} MPa	ρ $\frac{g}{cm^3}$	λ $\frac{W}{m \cdot K}$	c $\frac{J}{g \cdot K}$	α $\frac{1}{K} \cdot 10^{-6}$
Siliziumnitrid	RBSN	170	220	2,5	11	0,7	3,0
	HPSN/HIPSN	315	700	3,19	35	0,7	3,2
	SSN	290	650	3,21	32	0,7	3,4
Siliziumcarbid	SiSiC	> 350	> 300	3,05	85	0,9	4,4
	SSiC	410	450	$\geq 3,15$	70	1,0	4,6
Aluminiumoxid	Al_2O_3	360	240	$\geq 3,78$	25	0,9	8,0
Umwandlungs- verstärktes Aluminiumoxid	Al_2O_3/ZrO_2	340	650	4,15	25	0,85	8,1
Dispersions- keramik	$Al_2O_3/TiC/ZrO_2$	370	600	4,23	35	—	7,8
Zirkonoxid	Mg-PSZ	200	500	$\geq 5,73$	2,5	0,4	9,8
	Y-PSZ	—	1050	$\geq 5,97$	—	0,4	9,3
Aluminiumtitanat	ATI	20	40	3,2	2	0,7	2,0

Bild 21:

Kennwerte von Keramikwerkstoffen

IFKO – Universität Hannover – Prof. Dr.-Ing. Groth

mit Graphit oder salzförmigen Stoffen – auch Schmelzen – zu lösen versuchen [24]. Das ist jedoch ein Problem, das nicht zur sehr nahen Zukunft gehört.

5.6 Vom Nennpunkt abweichender Betrieb – Motor-Management

Gelegentlich gibt es in der betrieblichen Praxis und bei der Neubauplanung die Meinung, man solle den ganzen Microprozessor-„Klim-bim“, der zur optimalen Motoranpassung an den jeweiligen Betriebspunkt gehört, aus Sicherheitsgründen fortlassen. Man solle die Motoren so konstruieren, daß sie alle Anforderungen bezüglich besonderer Betriebspunkte – man denke an Schwachlastbetrieb oder extrem tiefe Temperaturen – klaglos ertragen.

Diese Einstellung ist verständlich aus der Sicht des Benutzers, der ungute Erfahrungen, z.B. mit häufigen Sensorausfällen und Mängeln an Rechnern, ungeeigneter Software und störanfälligen Hilfseinrichtungen gemacht hat. Diese Einstellung verstellt aber den Blick für das Notwendige in der Zukunft. Man kann überzeugt sein, daß die Entwicklung in Richtung optimaler, automatischer Anpassung des Motors an den Betriebspunkt – nicht nur bei Schiffsanlagen – gehen muß [25].

1. Einspritzsystem

- 1.1 Verstellen der Düsengeometrie („Gummi-Düse“)
- 1.2 Verstellen des Druckes bei Anlagen mit und ohne Speicher
- 1.3 Verstellen des Einspritzzeitpunktes nach Kennfeldpunkt (last- und drehzahlabhängig)
- 1.4 Ladeluftdichte – abhängige Füllungsbegrenzung
- 1.5 Verstellen der Pilotmenge und/oder des Abstandes zur Hauptmenge

2. Gaswechsel

- 2.1 Variable Ventilsteuerzeiten und/oder Überschneidungen
- 2.2 Variable Ventilhub
- 2.3 Variable Schaltung der Abgasturbolader einstufig und zweistufig (siehe auch 4.3)

3. Kühlung

- 3.1 Regelung oder Steuerung der Kühlmitteltemperatur nach Last und Schwefelgehalt
- 3.2 Steuerung der Ladelufttemperatur nach Last und Schwefelgehalt
- 3.3 Verstellungen gemäß 3.1 und 3.2 nach „Ignition Quality“

4. Kombinierte Programme

- 4.1 Kombinierte Optimal-Programme für Economic-Betrieb
- 4.2 Kombinierte Optimal-Programme für Abgasemission und ggf. Geräuschemission
- 4.3 Kombinierte Optimal-Programme für Beschleunigung

Bild 22

Welches sind die zu beachtenden Anpassungen bzw. Verstellungen?

Bild 22 zeigt eine tabellarische Aufstellung.

Was die einzelnen Punkte 1–4 betrifft, so gibt es bereits einzelne beachtliche Entwicklungen. In der Patentliteratur wimmelt es von „Gummi-Düsen“. Erinnert sei auch an die großen Erfolge bei der Registeraufladung bei sehr hohen Aufladegraden. Der Zusammenhang von Motorbetriebspunkten und Gefährdung heißer Bauteile durch Naßkorrosion wurde im IFKO insbesondere durch Arbeiten von Teetz [26], [28] auf einen verwertbaren neuen Stand gebracht. Ein Beispiel für die sinnvolle Verwertung zeigt Lausch [8]. Weniger beachtet wird bislang noch das Teetz'sche Ergebnis [27], daß die Naßkorrosionsgefährdung außer mit dem Schwefelgehalt auch mit der Härte der Verbrennung zunimmt. Das ist in Anbetracht des Dranges zur Verminderung des spezifischen Verbrauchs zunächst verständlich: Den zu erwartenden erhöhten Korrosionsverschleiß bemerkt man erst später. Diese Schwierigkeit kann zum Teil dadurch behoben werden, daß man für eine entsprechende Anhebung der Bauteiltemperatur für diese Betriebsart vorsorgt. Auf der anderen Seite kann die Notwendigkeit, die primäre Geräuschemission an der Quelle zu senken, in Zukunft auch zum Senken des Druckgradienten führen.

Was den erforderlichen Anteil der „ungeliebten“ Elektronik bzw. Microelektronik angeht, sei hier darauf hingewiesen, daß im Automobilbau dieser Anteil in wenigen Jahren bis auf 10% der Herstellkosten des Automobils angestiegen ist [29].

Ein näherliegendes Beispiel ist der moderne Kraftwerksbau: Bei einem Gas-Dampf-Kombi-Kraftwerk der neuesten Bauart wird eine offene Gasturbine mittels durch Abwärme beheizter Kohlevergasung gewonnenen Gases betrieben. Das Abgas der Gasturbine wird zur Wasserdampferzeugung benutzt. Die Dampfturbine arbeitet im Zweidruckprozeß. Mit dieser Kombination wird eine sehr hohe Wirtschaftlichkeit erreicht. Für uns ist entscheidend, daß der gesamte Prozeß nicht nur mit Sensoren des letzten Standes überwacht, sondern mit Hilfe der Microelektronik automatisch optimal gesteuert wird. Im Kraftwerksbau begann ab etwa 1980 der vermehrte Einsatz von Busgekoppelten, speicherprogrammierten Prozeßleittechnik-Systemen in Microelektronik. Diese Systeme haben sich dort bereits gut bewährt.

Eine bereits im Motorenbau vollzogene Teilanwendung stellt im übrigen die „Online-Optimierung“ dar, über die kürzlich von Lausch berichtet worden ist [8].

Eine wesentliche Voraussetzung für die konsequente Anwendung eines Motor-Managements zur optimalen Anpassung des Motors an den jeweils geforderten Betriebspunkt sind weitere Anstrengungen zur Schaffung ausreichend standfester Sensoren. Dabei ist die Standfestigkeit im Schiffsbetrieb sicherlich wesentlich problematischer als bei den Dieselmotoren höchsten Wirtschaftlichkeit und mit der weitestgehenden Ausnutzung der Verlustströme in der Zukunft.

6. Schlußbetrachtung

Abschließend soll nur noch zusammenfassend auf einige weitere Fragen, welche die Dieselmotorenbauer stark bewegen, eingegangen werden. Da ist die Zukunft der

Diesel-Gas-Motoren, die interessante Potentiale enthaltende Wasserstofftechnik im Mittelmotorenbau, die maßgebenden und zugleich faszinierenden Entwicklungstendenzen und -möglichkeiten im konstruktiven Bereich, insbesondere bei Kolben, Ventilen, neuer Gleitlagertechnik, Fragen der Zylinderbüchsen, Lagerung im Gehäuse und alle Probleme der konstruktiven Anpassung an den Schwerölbetrieb. Auch Werkstoffneuerungen und spezielle Beschichtungen werden großen Einfluß haben. Der Übergang von Grauguß- auf Sphärogußgehäuse ist bereits ein die Sicherheit erhöhender Fortschritt einfacher Art. Fragen der zukünftigen Brennstoffe, auch im Zusammenwirken mit neueren Motorenölen für Ölumlaufsysteme und für Zylinderölschmierung seien hier noch erwähnt.

Es wurde versucht, die Bedeutung und das Entwicklungspotential der mittelschnelllaufenden Dieselmotoren wenigstens im Ansatz deutlich zu machen. Dazu wurde ein Überblick über die Entwicklungsfragen gegeben.

Die Motorenhersteller können erwarten und sind darauf eingestellt, daß man das bei uns im europäischen Raum vorhandene „High Tech“-Spezialwissen und den „Know-how“-Vorsprung in diesem hochinteressanten Zweig des Motorenbaus nutzt, um den Mittelmotorenbau bei uns voran zu bringen. Unsere deutschen und europäischen Förderungsinstanzen sollten ihren Blick für die Bedeutung dieses Wirtschaftszweiges, trotz zeitweiliger Blendung durch Raumfahrt und andere spektakuläre Nutzer öffentlicher Mittel schärfen und das ihre tun. Der Verfasser hält es für müßig, zu diskutieren, ob wir in den vergangenen Jahrzehnten bei der weltweiten Lizenzvergabe³⁾ vielleicht Fehler gemacht haben und/oder ob protektionistische Maßnahmen bei der Ausnutzung von Währungs- und Lohnkostengefällen⁴⁾ erwünscht sind. Fest steht, daß das große Potential der Mittelmotoren zugleich ein zu beachtendes Wirtschaftspotential der Bundesrepublik und West-Europas darstellt.

7. Literatur

- [1] N.N., *Bulletin of the MESZ*, Vol. 16, No. 2, S. 56, 1988, No. 2, S. 31.
- [2] ETZOLD, S.: Entwicklungsstand und Aussichten der mittelschnelllaufenden Dieselmotoren, Diplomarbeit IFKO Hannover, 1988.
- [3] WOSCHNI, G.: Grenzen der Kraftstoffverbrauchsverbesserung durch die Prozeßführung bei Schiffsdieselmotoren, *STG-Jahrbuch* 74 (1980), S. 109 f.
- [4] SCHIFF, A.: Energie und Schiffsantrieb – Versuch einer Prognose, *Jahrbuch der STG* 74 (1980), S. 95 f.
- [5] BOZUNG, H.-G. und LOCHBICHLER, W.: MAN B&W-Mittelschnellläufer – das Motorenkonzept für die 90er Jahre, *Forschen, Planen, Bauen*, Ausgabe 1988, S. 42/49.
- [6] WILDE, K.: Dieselmotoren auf der SMM 88, *MTZ* 49 (1988), 4. 12., S. 520/523.

³⁾ Die Zahl der Lizenzmotoren, größtenteils im fernen Osten gebaut, ist im Bereich der Kreuzkopf-Zweitakter rund 10 mal so groß wie die der Original-Motoren. Bei den Mittelmotoren liegt dieser Wert noch deutlich tiefer.

⁴⁾ Westeuropäische Lizenzgeber können Motoren im RGW-Bereich bauen lassen, und diese mit Gewinn auf dem Weltmarkt wettbewerbsgünstig anbieten.

- [7] WESSELO, J.-H.: Wohin führt die Entwicklung von mittelschnellaufenden Dieselmotoren, Jahrbuch der STG 77 (1983), S. 81 f.
- [8] LAUSCH, W. und GRÜNAUG, P.: On-line-Optimierung – eine Voraussetzung für den Entwicklungserfolg des Motors L 40/54 von MAN B&W, MTZ 49 (1988), H. 11, S. 451/457.
- [9] SYASSEN, O.: Der konsequente 4-Takt-Dieselmotor, Vortrag am 7. 12. 88, IFKO Hannover, Die Weiterentwicklungsmöglichkeiten mittlerer und großer 4-Takt-Dieselmotoren, Schiff & Hafen, H. 1 (1988), S. 46 f.
- [10] DEUTSCHMANN, H.: Neue Vorhaben zu Mitteldrucksteigerungen abgas-turboaufladener Dieselmotoren, MTZ 44 (1983), 11, S. 431 f. und: Die zweistufige Registeraufladung – der ökonomische Weg zum Dieselmotor der Zukunft, Ehrenpromotionsvortrag, Hannover 7. 12. 1988.
- [11] N.N., Wärtsilä Vasa 46, The really reliable engine, Firmen-Prospekt Wärtsilä Diesel, 1988, S. 13.
- [12] SYASSEN, O.: Viertakt-Größtmotoren, MTZ 37 (1976), H. 5, S. 173 f.
- [13] GROTH, K.: Der Dieselmotor heute und seine Zukunftsaussichten, MTZ 33 (1972), H. 6, S. 238 f.
- [14] BOZUNG, H.-G.: Developing exhaust gas turbochargers for wide ranging applications, The Motor Ship, March 1988, S. 10 f.
- [15] LAUSCH, W.: Möglichkeiten und Grenzen von Kraftstoffeinspritzsystemen hoher Intensität bei Viertakt-Großdieselmotoren, Antrittsvorlesung, IFKO Hannover 1987.
- [16] WOSCHNI, G., NOTZ, W., AUGUSTIN, U. und SCHWARZ, V.: Ermittlung des Einspritzverlaufs am schnellaufenden Dieselmotor, MTZ 49 (1988), H. 12, S. 491/496.
- [17] THIEMANN, W.: Messungen und Rechnungen zur Bestimmung der Abhängigkeit des Verbrennungsablaufs vom Einspritzvorgang im schnellaufenden Dieselmotor mit direkter Kraftstoffeinspritzung, Diss. Universität der Bundeswehr, Hamburg 1988.
- [18] KLEINE, H.: Stickoxidentwicklung im Verlauf der dieselmotorischen Verbrennung, Diss. Universität Hannover, 1976.
- [19] SCHNURBEIN v., E.: Neue Entwicklungsergebnisse an mittelschnellaufenden Viertaktmotoren mit Stauaufladung, Vortrag auf der „3. Aufladetechnischen Konferenz“, ETH Zürich, 14./16. 9. 1988.
- [20] SCHACHT, H.J. und ZWINGMANN, U.: Der MaK-Motor M 601 und seine Voraussetzungen für die Leistungserhöhung und Kraftstoffverbrauchssenkung, MTZ 45 (1983), H. 11, S. 431 f.
- [21] SCHIFF, A.: General survey of the improvements in marine diesel engineering in the next four years, Trieste, 27. 9. 84, Panel Session, Marine Engineering Systems for the future.
- [22] PUCHER, H.: Analyse und Grenzen der Kraftstoffverbrauchsverbesserung bei Schiffsdieselmotoren im Turbocompoundbetrieb, STG 83, Hauptversammlung in Berlin, 16. bis 19. 11. 1988.
- [23] N.N., Super-Turbo-Generating-System for marine diesel waste energy recovery, Diesel & Gas Turbine worldwide, March 1988, S. 21 f.
- [24] GLÜSING, H.: Lubricating Engineering Ceramics: Novel Lubricants for Novel Materials?, Fuchs Technical Meeting, Nice, June 1988.
- [25] LUSTGARTEN, G.: Entwicklungsschwerpunkte der Sulzer RTA-Motoren, MTZ 49 (1988), H. 11, S. 441/447.
- [26] TEETZ, C.: Beitrag zur Verminderung der Naßkorrosion im Dieselmotor, Diss. Univ. Hannover 1984, VDI-Forschungsheft 626 (1984).
- [27] TEETZ, C.: Einfluß des Brennbeginns auf den Zwickelverschleiß im Dieselmotor, MTZ 44 (1983), H. 12, S. 471/473.
- [28] GROTH, K. et al.: Brennstoffe für Dieselmotoren heute und morgen – Rückstandsöle, Mischkomponenten, Alternativen – Expert-Verlag, Ehningen 1989.

- [29] LUSTGARTEN, G. und BAUMGARTNER, P.: The Sulzer S20 – An Engine for the 90s, *Schiff & Hafen*, Heft 12 (1988), S. 28/42.
- [30] BEHRENS, R., GROTH, K. und KRAUSE, D.: Schwerölforschung am Institut für Kolbenmaschinen der Universität Hannover, *Schiff & Hafen*, Heft 10 (1988), S. 124/129.